

能動的図形更新によるカメラキャリブレーション

-楕円錐投影法：Projection of Elliptic Cone Method(PEC法)-

加藤 晃市, 仲西 正, 大隅 規由, 伴野 明, 塩 昭夫

NTTヒューマンインタフェース研究所

〒238--03 横須賀市 武 1--2356

あらまし カメラキャリブレーションは、コンピュータビジョンにおいて必要不可欠な基本的技術であり、多くの研究がなされてきたが、汎用的かつ容易な手法は依然として確立されていない。本手法では、試験対象としてフラットな表示装置を利用し、この装置上に描かれる図形を測定対象であるカメラによって観測する。ここで得られた幾何学情報をフィードバックし表示図形を更新する手段を繰り返す。上記処理により、従来法では測定困難とされていた強度の収差歪みを有する光学系においても、純粋な射影幾何計算のみでカメラパラメータが得られることを示す。また、実験では、魚眼レンズに対して本手法を適用しその有効性を確認した。

和文キーワード カリブレーション、液晶ディスプレイ、内部パラメータ、魚眼レンズ

Camera Calibration by Projection of Elliptic Cone Method

Koichi KATO, Tadashi NAKANISHI, Noriyoshi OSUMI,
Akira TOMONO, and Akio SHIO

NTT Human Interface Labs
1-2356 Take, Yokosuka, JAPAN

Abstract A novel camera calibration method is proposed, employing a direct, geometrical approach called the projection of elliptic cone(PEC) method to be also proposed here. This method is capable of calculating the camera parameters without iterative algorithm. The camera parameters are computed from the geometrical relation between the display unit and the projection center by PEC method. An experiment with a fish-eye lens confirms concept of the proposed method.

英文 key words Camera calibration, Liquid crystal display, Internal parameters, Fish-eye lens

1 はじめに

コンピュータビジョンにおいて、画像から三次元計測を行う場合、そのカメラパラメータの把握（カメラキャリブレーション）は必要不可欠な課題であり、古くから多くの研究がなされている。画像による三次元計測とは、画像面上に結像された実空間中物体の投影像から、結像システムを推定し空間中に逆投影することで、実空間座標位置を求めるものである。従って、推定される物体の三次元位置は結像システムの精度に依存するため高精度なカメラパラメータの導出が重要となる。

これまでに提案されているカメラキャリブレーション手法は一般的に、空間中に配置された既知の試験対象を撮影し、予め設定したカメラモデルに従ってカメラパラメータを間接的に推定するものであった。また、その推定法は反復最適化を用いて解を求めるものが大半である[1][2][3][4]。本論文で提案する手法は、まず試験対象として液晶ディスプレイのようなフラットな表示装置を利用しディスプレイ上に図形を描画する。そのカメラ撮像面上での投影情報をフィードバックし図形を変化させることを繰り返し、純粋な射影幾何学計算のみでカメラパラメータを求める手法である。

本論文では、従来手法について解説した後、「能動的図形更新によるカメラキャリブレーション」を実現するための核となる楕円錐投影法：Projection of Elliptic Cone（以下PEC法と呼ぶ）を提案する。最後に、本手法を魚眼レンズに適用した実験結果について述べる。

2 従来手法

ここではまずカメラモデルについて述べ、その後従来手法の問題点を解説する。一般にテレビカメラ等の中心投影方式のセンサは図1に示すように画像全体にわたり1点の投影中心 O_p を持つ。ここで、投影中心から画像投影面に下ろした垂線の足を主点（Principal point）と呼び画像座標系 (U, V) における画像原点とする。ま

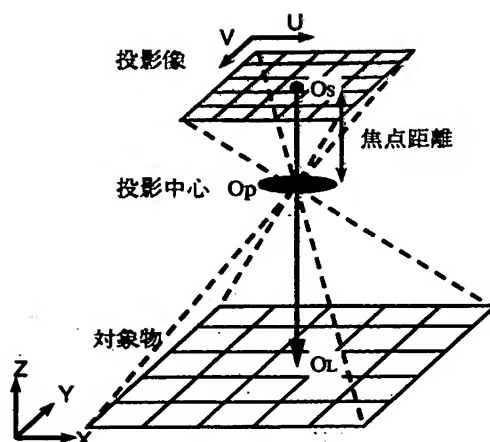


図1: 中心投影方式センサ
た、画像原点 O_s と O_p を結び空間中に伸びる直線を光軸と呼びその間の距離を焦点距離と呼んでいる。図1中の (X, Y, Z) はカメラの置かれた3次元空間のワールド座標系であり、カメラの位置、姿勢は、 O_p の空間中での位置座標と光軸方向の回転ベクトルによって決定される。これらを一般的にカメラの外部パラメータと呼び、焦点距離および画像原点、画像の歪係数等を内部パラメータと呼んでいる。画像の歪みは大別して、光学系歪みと撮像系ハードウェアに起因する歪みとに分けられる。

まず、光学系歪みは主として放射方向歪曲収差、接線方向歪曲収差、射影歪み等がある[5]。この内、放射方向歪曲収差は図2に示す様にレンズ中心 O に入射角 θ で入射した光が、本来到達すべき点 a ではなく a' に到達する現象により現われ、光軸周りに対称な歪みとなる。接線方向歪曲収差はレンズエレメントの光軸不一致に起因し、射影歪みは光軸と投影面の非直交に起因する。このどちらも回転対称とはならないが、一般的に放射方向の歪みより十分小さいと考えられ、ここでは放射方向歪みのみを光学歪みとする。以下これをレンズ収差と呼ぶ。

また、撮像系ハードウェアに関して現在主力であるCCDカメラによる画像入力システムでは、画像の縦横比（アスペクト比）が異なる歪みがある。以下これをアスペクト差異とよぶ。

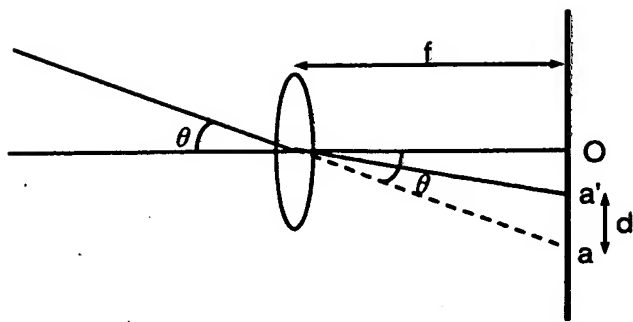


図2: 収差歪みの影響

通常、これらの歪みによる影響を表現するために「ピンホールモデル+歪みモデル」を用いる。つまり歪みのないカメラモデルに対する実画像のズレを補正分として加える[2][3]。このモデルでは、一般的にカメラモデルは高次の非線形方程式となり、陽には解が得られないため反復最適化法等を利用して解く。しかし、反復最適化法等を用いるため、カメラキャリブレーションをする上でその本質的問題ではない初期値の与え方、あるいは誤差最小化における指針が解に影響し、その信頼性を左右する問題がある[6]。また、ピンホールモデルを前提としたカメラモデルでは、例えば「魚眼レンズ」の様に広角視野を持つ光学系には適用困難である。

3 能動的図形更新によるカメラキャリブレーション

3.1 基本的考え方

カメラキャリブレーションにおける従来の研究は、総じて与えられた画像を観測値として間接的にパラメータを推定するものであったと言える。このパラメータ推定のために、光学系のふるまいを数理モデルとして記述するのが一般的であるが、結果としてキャリブレーションの本質ではない、解の導出というアプローチを取らざるおえない。これに対し本提案は、パラメータ推定を考えるのではなく、空間中に存在する唯一点の投影中心（視点位置）をレンズ外側から実測する事に主眼をおいた手法である。そのアプローチとして、投影中心から放射され

る光の軌跡を計測するものであり、物理的意味においてもカメラキャリブレーションというタスクに則した手法であると考ええる。

本手法におけるカメラモデルは、画像座標系を平面座標系とするのではなく、投影中心を原点とする極座標表現として記述する。これは、本手法が画像投影面の存在を前提とせず、画素毎の光路を直接計測するためである。具体的な座標系は、図3に示すように各画素を光軸を天頂とした時の天頂角 θ とX軸からの方位角 ϕ により、光軸に対する視線方向として表現する。

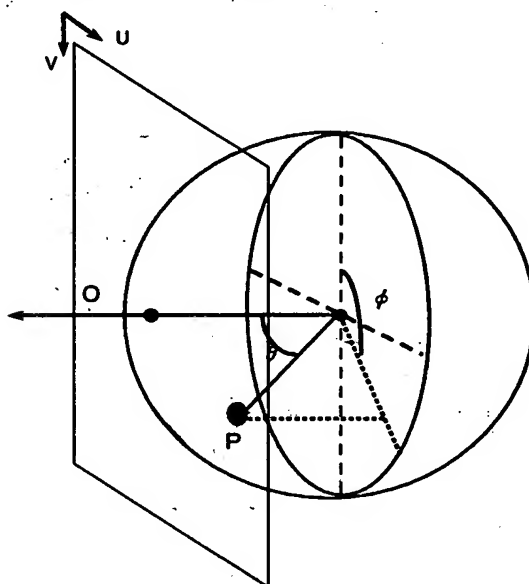


図3: カメラモデル

本手法は、画像原点導出処理、投影中心導出処理、視線マップ出力処理の3ステップにより構成される。以下にその具体的理論を説明する。

3.2 画像中心導出処理

第一ステップとして、画像原点導出処理を行なう。一般的には、光軸が画像投影面と交わる点を画像原点とするが、無視できない程の収差歪みを有するレンズ系ではその収差歪曲中心を画像原点とする。

具体的には、描画した直線の投影像（以下、投影線分）に対し、曲線として観測されるものがあれば、収差の影響有りとし、そうでない場

合は収差の影響無しとして処理を分ける。収差の影響がある場合は、投影線分に対してその直線性を求め最も直線らしく観測される複数方向の線分を求め、その交点を画像原点とする。収差の影響がない場合、同一平面上にない3組の並行線の投影線分消失点から求める方法[7][8]などを利用し画像原点を決定する。

3.3 投影中心導出処理(PEC法)

本ステップでは、本手法のパラメータ計測原理であるPEC法を用い、試験対象であるディスプレイと投影中心の相対位置を求める。まず、空間中において、投影中心を頂点とし光軸を中心軸とする円錐を考える。

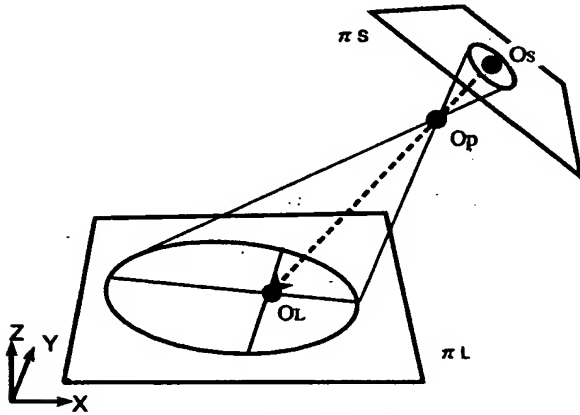
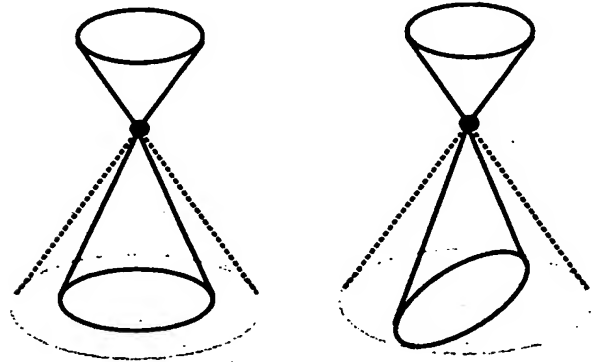


図4: 楕円錐投影

図4中 π_s は画像投影面であり、 π_L はディスプレイユニットの表示部である。これらは円錐の断面となり π_s では光軸と垂直であるため円、 π_L では円または楕円となる。言い替えれば、この円錐面は投影面上にて画像原点を中心とする円上に位置する画素列の視線軌跡であり、以下この円錐面を視線軌跡面と呼ぶ。但し、レンズ収差、アスペクト差異等が含まれる場合、投影面側の円錐(以下、内部円錐)とレンズ外側の円錐(以下、外部円錐)とは必ずしも一致しない。レンズ収差は画像中心に対して半径方向に比例するものである。よって、投影面上の円は拡大縮小のみ影響される。視線軌跡面を考えると、これは内部円錐と外部円錐の頂角の差として現われる(図5.a)。アスペクト差異の影響は

π_L の U 軸方向の伸縮として現われる。これは内部円錐を楕円錐に変形することとなる。逆に言えば投影像が円として観測されるような画素列の視線軌跡は外部にて楕円錐を形成する(図5.b)。



a. 収差歪曲

b. アスペクト差異

図5: 視線軌跡に対する歪みの影響

以上より、投影面上にて画像原点を中心とする円上の画素列が形成する視線軌跡はレンズ外側において、光軸を中心軸とする楕円錐を形成することが分かる。

ここで、外部円錐について π_L 上の O_L を通る直線は必ず π_s 上の O_s を通る直線として観測される。 π_L 上の直線を l_1 とし、これと光軸を含む面を π_p として定義する(図6)。 π_p によって切ら

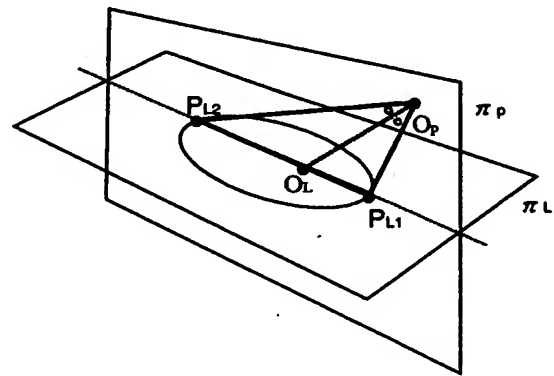


図6: 外部円錐断面

れる外部円錐の断面は O_p, P_1, P_2 を結ぶ三角形となり、光軸は O_p の角の二等分線となる。しか

し、実際には O_p の位置および π_p の傾きは未知であり、 O_L, P_1, P_2 のみが、画像原点对応点とそこから投影面上で等距離に観測された直線上の二点を探索する処理によって得られる。図7に示す三角形において角の二等分線の性質を考えると、 $AC:BC=AO:BO$ という関係が成立するため、 C は $(\frac{x_a x_b}{x_a + x_b}, 0)$ を中心とし、半径 $\frac{x_a x_b}{x_a + x_b}$ の円となる。先ほどの π_L 上の直線では、 O_p の存在範囲は図8に示すような P_1, P_2 の延長上に中心をもつ球の表面に限定できる。

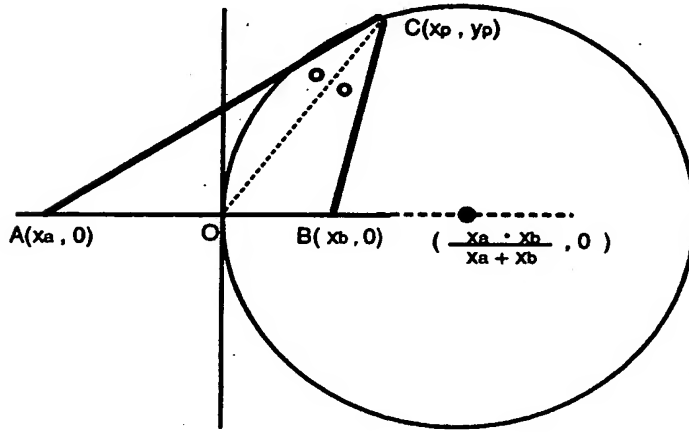


図7: 円錐断面上の投影中心存在軌跡

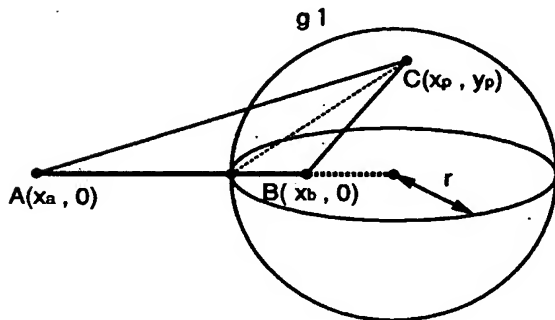


図8: 投影中心存在範囲

さらに、 O_L を通る直線をもう一本想定し球を求めると図9に示す様に二つの球 g_1, g_2 が設定でき、 O_p の存在範囲は g_1, g_2 の交線上 c_p に限定できる。この C_p を含み π_L に垂直な面を π_p とする。 g_1, g_2 の中心を $(x_1, y_1) (x_2, y_2)$ とすると

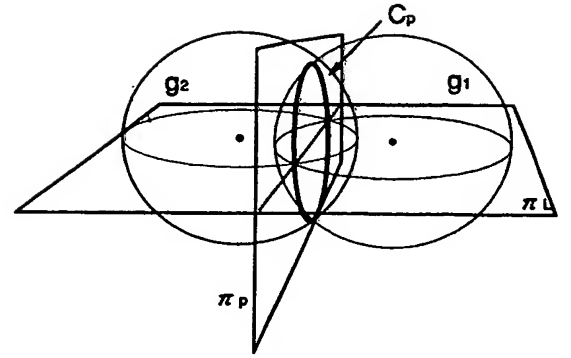


図9: 頂角二等分条件による O_p 軌跡 C_p の中心 (x_3, y_3) は

$$x_3 = \frac{(y_2 - y_1)(x_1 y_2 - x_2 y_1)}{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (1)$$

$$y_3 = \frac{(x_1 - x_2)(x_1 y_2 - x_2 y_1)}{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (2)$$

となる。ここで、図10に示す様に π_L 上に描かれた線分 l_1, l_2 が θ_L で交差し、 π_p 上で θ_p で交わると観測されたとする。図10中の l_1 と光軸 l_0 を包含

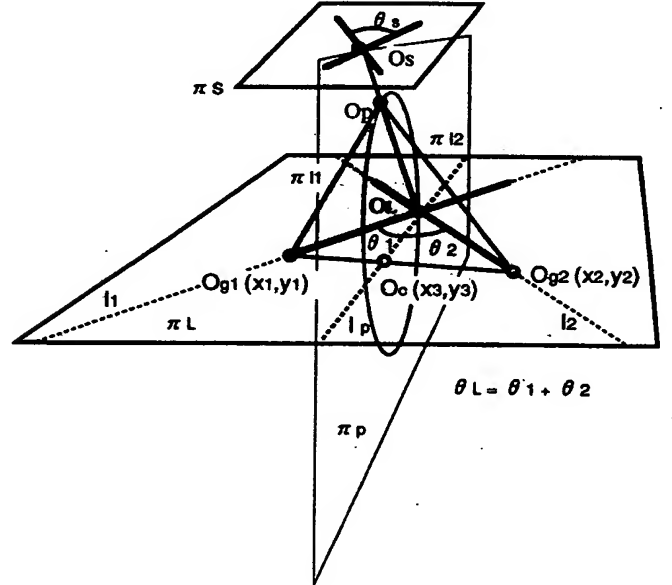


図10: 線分交角と見かけの角度の関係

する面を π_1, l_2 と光軸 l_0 を包含する面を π_2 とする。 π_p 上で l_1, l_2 が θ_p で交わると観測されるということは、 π_1, π_2 が θ_p で交差することと等しい。ただし、投影面のアスペクト比に差異があるような場合この条件は満たされない。

よって、 l_1, l_2 を π_p 上にて各々 U 軸、 V 軸に平行な二直線を選択するものとする。この選択によってレンズ収差及びアスペクト差異があった場合においても π_1, π_2 の直交性が保持される。

π_p と π_L の交線を l_p とし l_1, l_p のなす角を θ_1 、 l_2, l_p のなす角を θ_2 とすれば、

$$\tan \theta_1 = \frac{x_1 y_3 - x_3 y_1}{x_1 x_3 + y_1 y_3} \quad (3)$$

$$\tan \theta_2 = \frac{x_2 y_3 - x_3 y_2}{x_2 x_3 + y_2 y_3} \quad (4)$$

となり、 π_p 上において l_p と光軸 l_o のなす角 θ_p は

$$\theta_p = \sin^{-1}(\sqrt{\tan \theta_1 \tan \theta_2}) \quad (5)$$

によって与えられる。以上の幾何学的条件から図11のように O_p の位置は一意に決まり、

$$x_p = 2x_c \cos^2 \theta_p \quad (6)$$

$$y_p = 2y_c \cos^2 \theta_p \quad (7)$$

$$z_p = 2 \cos \theta_p \sin \theta_p \sqrt{x_c^2 + y_c^2} \quad (8)$$

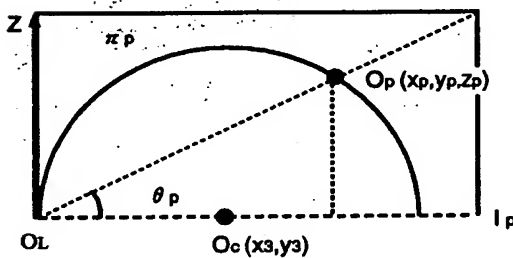


図 11: 投影中心位置の導出

となる。

但し、本手法は π_L が光軸と垂直になる場合、どの線分をとっても球の半径が無限大となるため測定不能であるが、その場合ディスプレイユニットを置き直せばよい。これは、従来手法においてよく見られる「テストパターンは光軸に対して垂直とする」という条件に比べ、現実性が高く測定を容易にしている。

3.4 視線マップ出力処理

前ステップにて、ディスプレイ π_L 上の各表示素子と投影中心の相対関係が得られた。よって、ディスプレイ上の各表示素子に対する投影面上での対応点を探索することで、投影面上各画素の光軸に対する視線方向が導出可能である。図12の様に、 π_L 上の $P_L(X_n, Y_n, 0)$ の点が投影面上の $P_S(U_n, V_n)$ にて観測されたとすれば、 P_S の視線方向の天頂角 θ_e は

$$\theta_e = \cos^{-1} \left(\frac{x_\alpha x_\beta + y_\alpha y_\beta + z_\alpha z_\beta}{\sqrt{(x_\alpha^2 + y_\alpha^2 + z_\alpha^2)(x_\beta^2 + y_\beta^2 + z_\beta^2)}} \right) \quad (9)$$

となる。但し、光軸の方向ベクトルを $\alpha(x_\alpha, y_\alpha, z_\alpha)$ 、 P_S の視線方向の方向ベクトルを $\beta(x_\beta, y_\beta, z_\beta)$ とする。方位角は、その基準位置 (0° となる方向ベクトル) を \vec{P}_0 とし、 P_0 および α のなす面の法線ベクトルを $\mu(x_\mu, y_\mu, z_\mu)$ とする。ここで、 α および β のなす面の法線ベクトルを $\nu(x_\nu, y_\nu, z_\nu)$ とすれば、方位角 θ_d は

$$\theta_d = \cos^{-1} \left(\frac{x_\mu x_\nu + y_\mu y_\nu + z_\mu z_\nu}{\sqrt{(x_\mu^2 + y_\mu^2 + z_\mu^2)(x_\nu^2 + y_\nu^2 + z_\nu^2)}} \right) \quad (10)$$

によって決定できる。

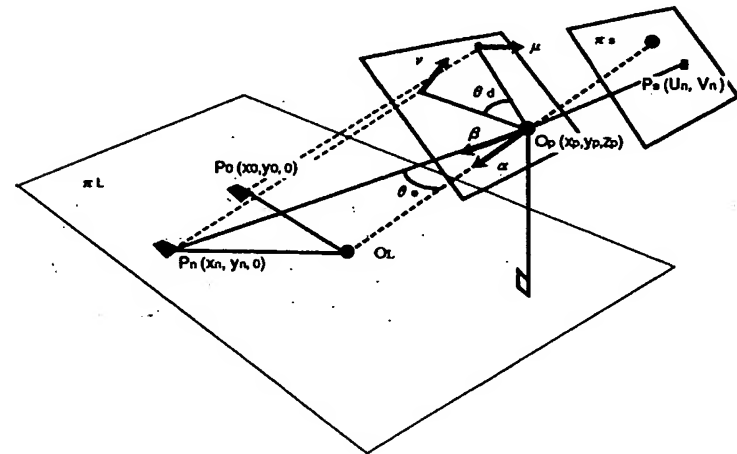


図 12: 各画素毎の視線方向検出

4 実験

本提案手法の検証を行うため、実験システムを構築した(図13)。実験に測定対象として使用したレンズは、焦点距離8mm、画角180°の全

周魚眼レンズである。試験対象とした液晶ディスプレイは、画素ピッチ $0.45\text{mm} \times 0.45\text{mm}$ で解像度 640×480 のものを使用した。実験では、液晶ディスプレイをカメラの光軸と明らかに交差すると思われる位置に光軸に対して直交しないよう傾けた状態で設置し測定した。

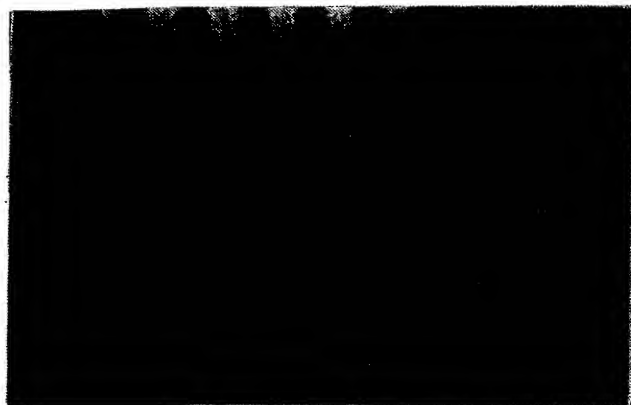


図 13: 実験システム

第一ステップにおける収差歪曲中心を求める処理では、直線をディスプレイに描画したものと無表示の状態の2枚の画像の差分から得られた投影像の直線性を評価することで行う。具体的には、最小二乗法により直線を当てはめた時の投影データの標準偏差を評価値とした。この結果を図14に示す。20回の試行ではほぼ同じ座標値を差し示しており、十分な精度が得られる。

第二ステップでは、前ステップで得られた画像中心座標をもとにして、投影中心を求めるための2線分の端点を検出する。具体的には、液晶面上x軸方向に軸方向に直線を移動させながら描画し画像面上にの注目画素を横切る直線群を検出し、その交点を求める。図15は、画像中心座標よりy軸方向およびx軸方向に20画素離れた点として観測されたものをプロットした結果である。実際の投影中心を求める処理では、画像中心 O_s からの距離を10~40画素変化させた場合の導出結果を平均し投影中心位置としている。図15中の O_h は、投影中心 O_p から液晶面に下ろした垂線の足の座標である。

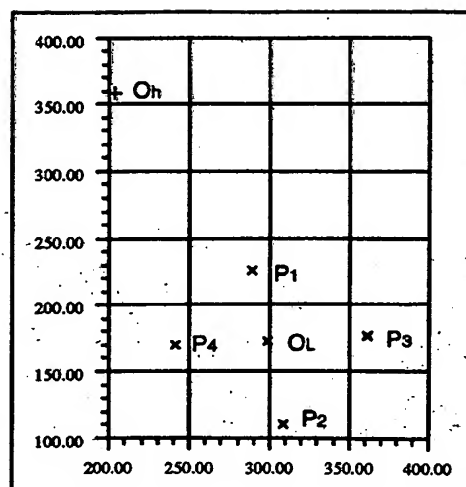


図 14: 収差歪曲中心導出結果

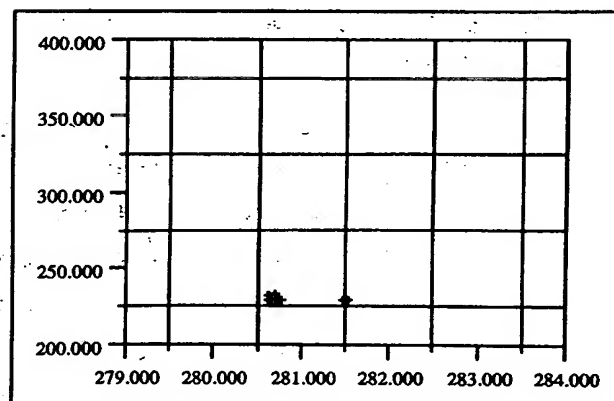


図 15: 投影中心導出結果

図16は、最終ステップにて得られた画素毎の視線方向を三次元表示した結果である。液晶面の方向を変更し2回の処理を行なった結果、視線方向のズレは平均 2.1° であり、画角 60° の範囲ではほぼ 1° 以内のズレであった。

5 まとめ

能動的図形更新によるカメラキャリブレーション法を提案した。本手法に従えば、従来法のように高精度な試験対象を用意することなく、かつ特殊な操作を要することなくカメラのパラメータを求める事が可能である。例えば、図形の明滅を繰り返して得た複数画像の差分を取ることで図形の自動抽出を行なうため、前

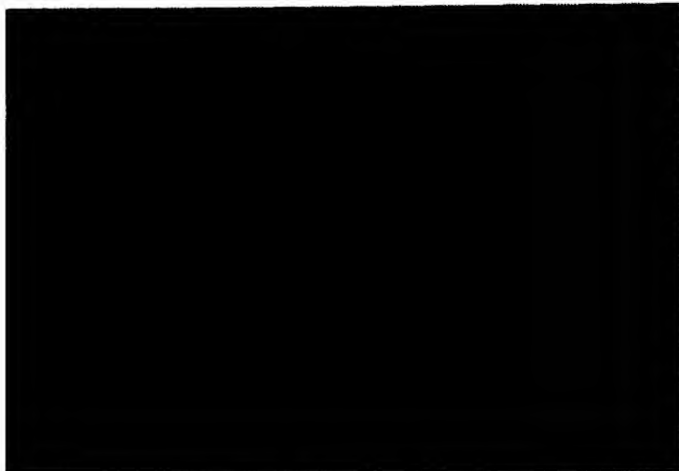


図 16: 視線方向マップ
もって図形抽出のためのしきい値設定等をする必要もなく、かつディスプレイはカメラ光軸に対して直交しないよう傾けるのみでよいため、測定が容易である。

パラメータ導出に関して従来法では、試験対象画像を用いてカメラモデルに対するパラメータ推定を行ってきたのに対し、本手法では、試験対象としてディスプレイを利用することでレンズ外部からパラメータを直接求めることが可能であることを示した。また、収差歪み、アスペクト差異を含む場合においても反復最適化手法等に依らず、PEC法により純粋な射影幾何計算のみでパラメータ導出が可能であることも特徴である。このパラメータ導出の核となるPEC法は、言わばレンズ外部における光路を測定する方法であり、従来手法に多く見られるような数値モデルに対する解の収束を試みる手法に比べ、物理的な意味においてより直接的アプローチであると考ええる。

本手法では、図形描画およびその評価を繰り返すので、パラメータ導出に時間を要するという問題がある。ただし、内部パラメータは一般的に、一度計測しておけばよく計算時間はあまり問題にならない。各ピクセル毎の視線方向マップは、カメラパラメータの記述に大容量の記憶装置を必要とするが、これは数値モデルを

用いず、直接光路を計測する特徴とのトレードオフである。また、近年の磁気記憶装置の大容量化、あるいはメモリの低価格化は、この問題点を十分に補いえるものと考ええる。

今後、検証実験をさらにを行い本手法の有効性および精度限界を明らかにする。

謝辞 本研究を進めるにあたり、研究の機会を与えて頂きましたNTT基礎研究所の石井健一郎情報科学部長、及び有益なコメントを頂いたヒューマンインタフェース研究所の荒川賢一主任研究員に深く感謝致します。また、日頃から御討論頂いた第六プロジェクトチームの皆様に御礼申し上げます。

参考文献

- [1] Shih S. W., Hung Y. P., and Lin W. S. : "An efficient and accurate camera calibration technique for 3d computer vision", Proc. of IEEE Computer Society Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, pp. 755-759(1992).
- [2] Weng J., Cohen P., and Herniou M. : "Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation", IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 14, 10, pp. 965-980(1992).
- [3] Tsai R. Y. : "A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3d machine vision metrology using off-the-shelf tv cameras and lenses", IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, RA-3, 4, pp. 323-344(1987).
- [4] 出口光一郎 : "画像と空間", 昭晃堂(1991).
- [5] 高木幹雄, 下田陽久 : "画像解析ハンドブック", 東京大学出版会(1990).
- [6] 出口光一郎 : "カメラキャリブレーション手法の最近の動向", 情報処理学会コンピュータビジョン研究会報告, 82-1, pp. 1-8(1993).
- [7] KANATANI K. : "Geometric Computation for Machine Vision", OXFORD SCIENCE PUBLICATIONS(1993).
- [8] Caprile B. and Torre V. : "Using vanishing points for camera calibration", International Journal of Computer Vision, 4, pp. 127-140(1990).

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.